

マルチロータ機を用いた無人火山観測システムの開発 — 現実に即した土石流シミュレーションの実現 —

○永谷 圭司 (東北大学) 谷島 諒丞 (東北大学) 羽田 靖史 (工学院大学)
伊豆 智幸 ((株) イームズラボ) 銭谷 彰 ((株) イームズラボ) 金崎 裕之 (国際航業 (株))
皆川 淳 (国際航業 (株)) 島田 徹 (国際航業 (株)) 森山 裕二 (国際航業 (株))

1. はじめに

我が国には、111もの活火山が存在する。これらの活火山では、毎年のようにどこかで噴火が発生し、時には犠牲者を生むような事態にまで発展する。このような、活動中の火山の周辺における防災・減災のための調査技術の開発は、喫緊の課題である。特に、甚大な被害をもたらす土石流予測を行う技術の開発は、住民避難を行う上で、非常に重要なものとなる。例えば、島原市は、雲仙普賢岳の1990年から1995年の噴火において、土石流による大きな被害を被った[1]。このような背景より、平成23年の土石流防止法改正では、火山噴火に起因する土石流について、国土交通省が緊急調査を実施し、土砂災害が想定される区域と時期を想定した結果を関係自治体に通知することが義務づけられた。

土石流の予測を行うためには、地形情報だけでなく、降灰厚、灰の種類に関する情報取得が重要である。しかしながら、立入制限区域内におけるこれらの情報取得は、これまで困難であったため、これまでの土石流シミュレーションは、噴火前に取得した精度の粗い地形情報ならびにコンサバティブな降灰パラメータを用いて実施されてきた。このため、例えば2011年の新燃岳の噴火では、このシミュレーションをベースに、繰り返し避難勧告が出たにも関わらず、土石流は発生せず、そのうち住民が避難しなくなるという状況が生じてしまった。このことから、現在、現実に即した土石流発生予測が求められており、そのためには、噴火直後に立入制限区域内の詳細な地形情報や降灰パラメータを取得可能な、無人センシング技術を実現することが求められている。このような背景の下、筆者らは、土石流シミュレーションへの適用を目的とし、飛行ロボットを活用した立入制限区域内における地形、降灰厚、灰の種類に関する情報を遠隔から取得するセンシング技術の研究開発を進めてきた。これまでに開発した各センシング技術の概要を以下に示す。

1. 画像データ・三次元地形データの収集技術：長距離飛行可能な複数プロペラを有する飛行ロボットにより、立入制限範囲内の状況把握を実施。
2. ピラミッド型スケールによる降灰厚測定技術：立入制限区域内における降灰厚測定を行うためのピラミッド型スケールと、飛行ロボットにより、これらを配備する技術。まず、噴火直前または直後に、サイズの異なるスケールを上空から撒く。噴火後、配備した領域の画像を取得し、視認可能なサイズのスケールを認識することで、降灰厚を測

定する。

3. 土砂サンプリング技術：山体斜面に堆積した火山堆積物を直接収集するための、飛行ロボット吊下げ型土砂サンプリング装置。この装置は、着地と同時に二つのローラを逆方向に回転させることで、100g程度の土砂を自動で取得することが可能である。
4. 表面流計測技術：飛行ロボット吊下げ型の表面流計測装置。この装置は、立入制限区域内に着陸後、搭載した水風船を割り、カメラで散水後の水の浸透状況を確認することで、火山灰の浸透能低下状況を直接確認することが可能となる。

また、上記の技術で取得したデータを反映させることが可能な、土石流シミュレーションを実装した。これにより、火山噴火時の災害対策に役立つことが期待できる。本稿では、開発したセンシング技術の概要を紹介すると共に、開発した土石流シミュレーションの結果例を紹介する。

2. 立入制限区域内のセンシング技術

2.1 三次元地形計測

これまで、大規模な自然災害では、情報収集のため、航空機や防災ヘリコプタ、人工衛星による画像情報の取得が行われてきた。しかしながら、火山噴火時には、噴煙などの影響から、迅速かつ安全に、立入制限区域内における高解像度の画像情報を得ることが困難であった。一方、小型無人機を用いた画像データの取得は、近傍から安全に画像情報を取得できるといった特徴があるため、火山調査手法として、近年着目されている[2]。特に、近年のラジコン技術の目覚ましい進歩により、ホバリングが可能な複数プロペラを搭載したラジコンヘリコプタ（以下、マルチロータ機）の連続航行時間、安定性、操縦性が飛躍的に向上し、長時間の安定飛行が可能となりつつある。そこで、筆者らの研究グループでは、マルチロータ機のプロペラ、モータ、モータドライバ、バッテリーを含む搭載重量の最適な組み合わせを検討することで、活動中の火山の立入制限区域外より離陸し、立入制限区域内の情報収集を行う、総飛行距離10km程度のフライトが可能なマルチロータ機を開発を行ってきた[3]。このマルチロータ機を用いて、100m程度の高度で面的なフライトにより取得した画像列を用いて、地形情報をデータベースに格納する。

平成28年11月に雲仙普賢岳で行ったフィールド試験では、水無川において、マルチロータ機を用いて1mメッシュの地形情報を取得し、過去にレーザプロファ

イラで取得された 10m メッシュの地形情報と比較した。図 4 の上図の比較からも、提案手法により、詳細な地形情報を獲得できていることが分かる。なお、シミュレーション結果の比較については 4 章で述べる。

2.2 降灰量推定

火山体源頭部における降灰の厚さを定点観測することを目的として、マルチロータ機により運搬可能な正四面体の投下型降灰厚スケール及び、投下装置を開発した。投下装置は、内部に 3つの格納スペースをもち、マルチロータ機とつながったテザーが装置の着陸時に緩んだことを感知して底部のふたが開き、格納したスケールを地上に投下する機能をもつ。スケールのサイズは、1, 2, 3, 10, 15 cm の 5 段階を作成した。このスケールを利用して降灰厚を測定する計測シナリオは、以下の 3 段階である。

1. 前兆現象を確認後、マルチロータ機と投下装置を用いてスケールを運搬・投下
2. 噴火発生後、降下火砕物により一部のスケールが埋積される
3. 降灰後に、カメラを搭載したマルチロータ機を投下地点に飛ばし、スケールを撮影

降灰後に撮影したスケールの中で、視認できない最大スケールのサイズが、その時点における降灰厚と推定できる。このスケールを用いた降灰厚計測のイメージを図 1 に示す。2016 年に実施した、この計測手法のフィールド試験については、[4] で詳細を述べた。これらの予備試験の結果、撮影範囲と視認性のバランスがよいのは、対地高度 50~70 m であることを把握した。また、上記高度にて撮影した場合、スケールの色は赤、黄色が判別可能であった。なお、スケールの色は土壌の色や植生の有無により使い分けが必要であることがわかった。

2.3 土砂サンプリング装置の開発

本研究では、土石流シミュレーションを実施する際に必要となる、火山噴出物の平均粒径や降灰浸透能に関するデータを、遠隔より迅速に収集することを目的としたマルチロータ吊り下げ型のローラ式土砂サンプリング装置を開発した。この装置は、マルチロータ機によって運搬され、対象環境の地面に着地後、2つのローラーが回転し、土砂を装置内に回収することを可能とする。この装置の動作概略を図 2 に示す。

さらに、装置に搭載した視覚センサを利用し、粒度分布測定の高精度化（分布形状の大まかな一致）を目指した。具体的には、土砂サンプリング装置に小型のカメラ（GoPro HERO シリーズ）を搭載し、土砂採取のため地上に接地した際に撮影した動画から、粒径や土砂性状を把握できるかを試みた。さらに、サンプリング装置で採取した土砂粒度と、その場でスコップ採取した土砂とを比較し、装置で採取した場合の特性について整理した上で、土砂を現場で簡易的にマイクロスコップにより確認する手法を検討した。なお、土砂サンプリング装置に関する解説ならびに性能評価については、[5] にて詳細を述べている。

2017 年度の雲仙普賢岳におけるフィールド試験では、現場にて、実際にサンプリング装置による土砂採取状

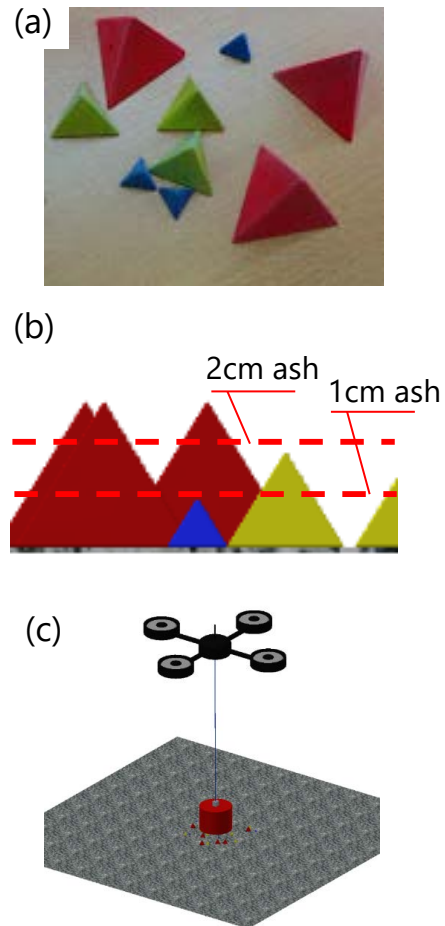


図 1 降灰厚スケール：(a) 製作したスケール。(b) このスケールを用いて降灰量を測定する原理を表している。灰が 1cm 堆積すると、青色スケールは埋もれて見えなくなり、黄色スケールが見えるため、降灰厚が 1cm 以上 2cm 未満と推定。このスケールの配備は、火山噴火直前または直後に行う。

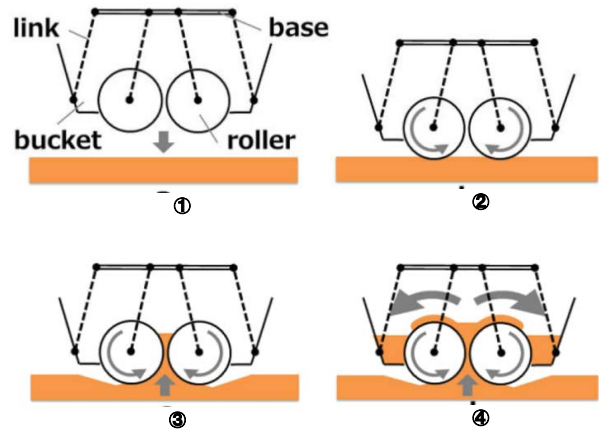


図 2 土砂サンプリング装置の動作概略。底面の 2つのローラーが逆方向に回転することで、装置直下の土砂を取得することが可能となる。

況を小型カメラで撮影し、粒径の概略把握が可能であることを確認すると共に、採取した土砂を現場にて簡易的にマイクロスコップで観察することで、概略的な

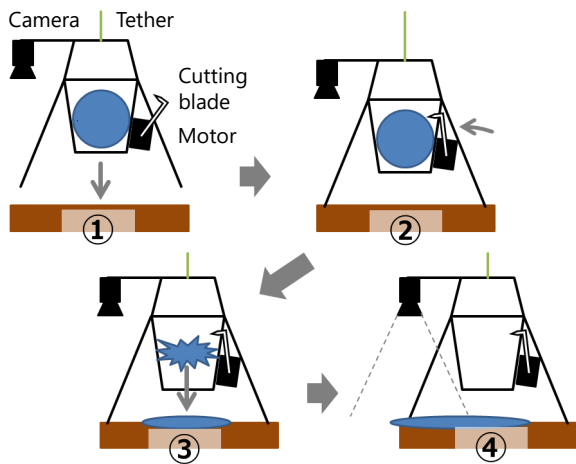


図3 表面流確認装置の動作概略.

粒度が把握できることを確認した。また、ここで取得したデータは、火山灰データベースとして格納し、土石流シミュレーション実施時、類似火山灰データの粒径条件や流出特性を計算に反映することで、より現実に即した土石流シミュレーションの実現を図ることとした。

2.4 表面流確認装置の開発

降灰後の土石流の発生に大きく寄与する条件として、降灰の質が挙げられる。細粒の降灰が堆積した場合、浸透性が低下して表面流が多量に発生するため、土石流が発生しやすくなる。一方、粗粒の降灰では、細粒に比べて発生する可能性が低くなる可能性が指摘されている。そこで、表面流の発生状況を直接観測できる、マルチロータ機吊り下げ型表面流確認装置を開発した。

この装置は、着陸時、マルチロータ機から吊り下げられたテザーが緩んだことを感知し、搭載したカッターが格納した水風船を割り、地面に散水する。次に、搭載したカメラで散水後の水の浸透状況を確認し、表面流発生リスクを定性的に判断する。図3に表面流確認装置の動作概要を示す。

筆者らは、雲仙普賢岳等でこの装置の動作試験を繰り返し、実験結果を元に、装置の改良を進めてきた。その結果、この装置により、以下に示す知見を得た。

- 傾斜地（15°）程度までの条件で表面流 2 回の散水をカメラにより撮影することが可能。
- 透水性が高い火山灰では、散水が迅速に浸透し、クレーター形状を形成。
- 透水性が低い火山灰では、散水が一時的に表面流を形成し、不定形のアメーバ状を形成。

この装置で取得したデータは、火山灰データベースとして格納し、シミュレーション実施時、現地観測結果から類似火山灰のデータの粒径条件や流出特性を計算に反映する。これにより、現実に即した土石流シミュレーションの実現を図ることとした。

3. 土石流シミュレーション

本研究の目標は、前章で紹介したセンシング装置を利用し、現実に即した土石流シミュレーションを迅速に実施できる環境を構築することである。土石流シミュレーションの基本的な構成は、既存の枠組み [6] を利用

し、これに今まで取得困難であったパラメータを適用することで、現実に即したシミュレーションの実現を目指す。一般に、この種のシミュレーションは、大きく分けて、 \square 上流域の地形や降灰状況から流出解析により谷出口のハイドログラフを作成し、 \square 下流域の計算メッシュを作成し2次元氾濫計算で氾濫範囲を想定する、という二段階で実施される。

土石流シミュレーションの入力条件となる流出量の算出方法（流出解析）は、国土交通省などで実施される緊急調査の事例等を調査し、緊急調査と同様のキネマティックウェーブ法による流量算出をマルチロータ機等で取得した詳細な地形データを利用するものとした。また、キネマティックウェーブ法の流出解析に必要な条件として、流域の降灰範囲の把握が重要であることから、各地点における降灰調査結果を用いて、等降灰量線データを作成するプログラムを開発した。なお、等降灰量線作成ロジックは、既往手法 [7] を活用した。また、装置等で得られる情報は、定量的な流出率や粒径として評価することが困難であるため、事前に火山灰データベースにより整理した降灰タイプから類似した降灰の値を土石流シミュレーションに反映することとした。

雲仙普賢岳で実施したセンシング試験の結果を用いた土石流シミュレーション結果を以下に示す。まず、2.1節で紹介した技術を用いて獲得した三次元地形データと、国土地理院が全国一律に公表している 10 mメッシュから作成した地形データのシミュレーション結果を比較した。比較結果を図4に示す。この結果より、マルチロータ機により取得した詳細な地形データの方が、より細部の地形表現を再現しているため、土石流の流下に影響を与える流路や狭窄部、及び構造物の影響を適切に評価していることが見て取れる。

次に、2.2節から2.4節で紹介した技術を用いて、獲得した降灰の範囲や特性を把握することで、計算対象流域の降灰の有無がシミュレーションに与える影響を評価した。なお、2.3節、2.4で示した降灰の特性は、谷出口の流出解析に影響を与えるため、この流出点におけるハイドログラフの作成に影響を与える。図[fig:Sim2]に、降灰有りと降灰無しのシミュレーション結果の比較を示す。この図より、降灰有りの結果は、降灰無しに比べて到達範囲がより下流に広がる結果となることが見て取れる。

以上より、立入制限区域内における地形情報、降灰厚、灰の種類について、飛行ロボットを活用したセンシング技術を用いることで、現実に即した土石流シミュレーションを実現することが可能となると期待できる。

4. まとめ

本研究では、現実に即した土石流シミュレーションの実現を目指し、飛行ロボットを活用した立入制限区域内における地形情報、降灰厚、灰の種類に関する情報を遠隔から取得するセンシング技術を実装した。また、この技術で取得したデータを反映させることが可能な、土石流シミュレーションを開発した。

本技術の独自性は、飛行ロボット用いたセンシング技術を駆使して、現実に即した土石流発生予測を行う土石流シミュレーションを実現した点にある。また、こ

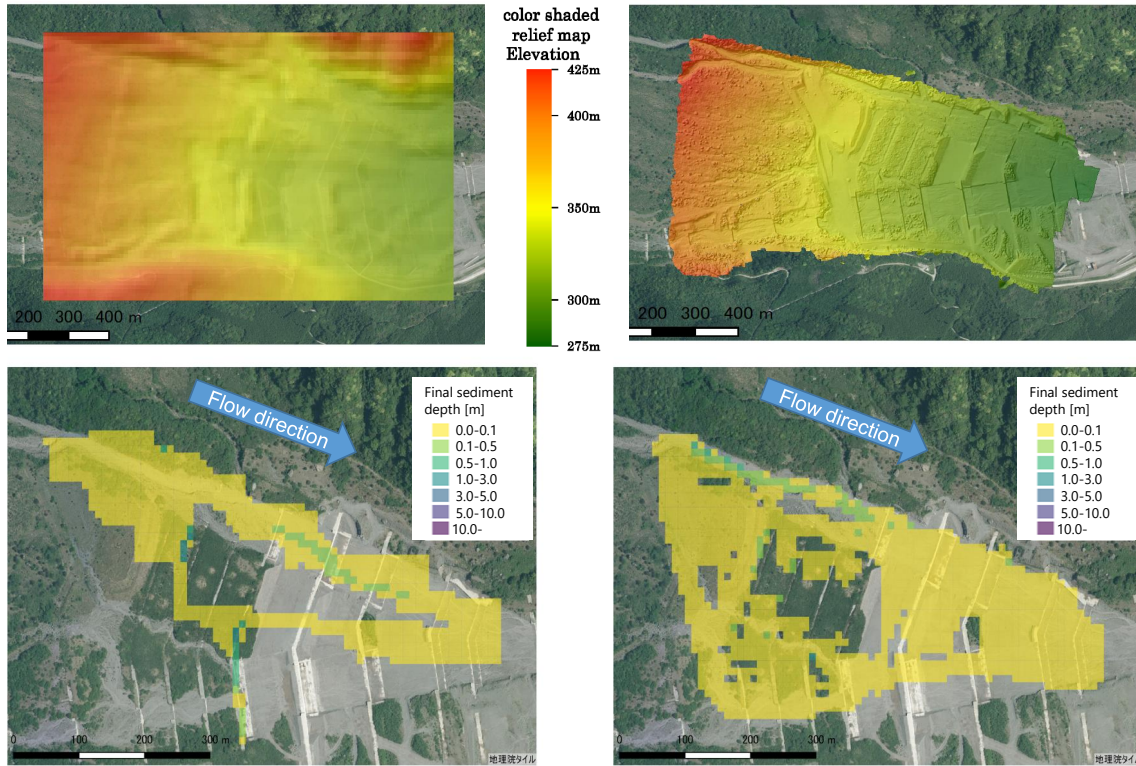


図4 三次元地形データの精度が土石流シミュレーション結果に与える影響の比較。左上図は国土地理院の10mメッシュの水無川流域地形，右上図はマルチロータ機で取得した1mメッシュの地形。左下図は10mメッシュで実施した土石流シミュレーション結果，右下図は1mメッシュで実施した土石流シミュレーション結果を表す。

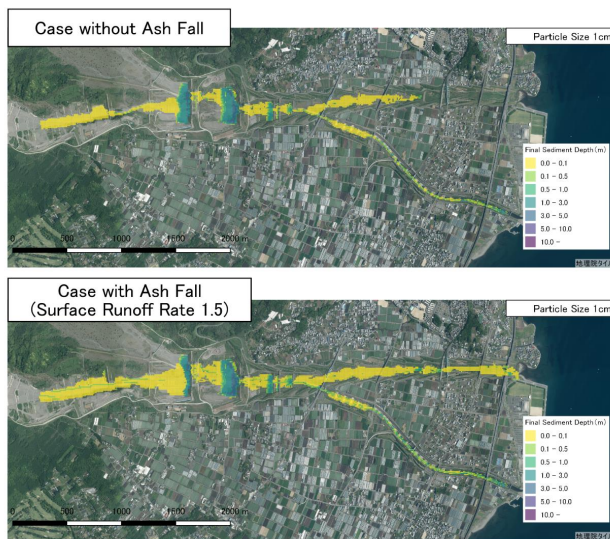


図5 土石流シミュレーションの結果その2：降灰量計測がシミュレーション結果に与える影響の比較。上図が降灰を考慮しない場合のシミュレーション結果，下図が降灰を考慮したシミュレーション結果を表す。

れを実現するための降灰厚測定技術，土砂サンプリング技術，表面流計測技術について，比較的単純な仕組みで確実に情報取得を行うことも大きな成果である。今後は，各センシング技術の向上を試みると共に，これを活用する枠組みを確立することで，現実に即したシミュレーションの実現を目指す。

謝辞：本研究は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」からの研究助成により行われたものです。

参考文献

- [1] Setsuya Nakada and Toshitsugu Fujii. Preliminary report on the activity at Unzen Volcano (Japan), November 1990-November 1991. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, ORNL/TM-12410:310-333, 1993.
- [2] 飛田幹男, 神谷 泉, 中埜貴元, 岩橋純子, 大角光司, 高桑紀之. 無人機による西之島地形計測の高精度化. In *国土地理院時報*, 125, pages 145-154, 2014.
- [3] 永谷 圭司, 藤原伸也, 伊豆 智幸. Nedo インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト～東北大学コンソーシアムの2014年の取り組みと今後の課題～. In *第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集*, pages AC1F3-02, September 2015.
- [4] 永谷 圭司, 谷島 諒丞, 桐林 星河, 伊豆 智幸, 金井 啓通, 金崎 裕之, 皆川 淳, 島田徹, 森山 裕二. マルチロータ機を用いた無人火山観測システムの開発 2016年雲仙普賢岳におけるフィールド試験. In *第35回日本ロボット学会学術講演会予稿集*, pages 1E3-03, September 2017.
- [5] 谷島諒丞, 久利美和, 永谷圭司. マルチロータ機搭載型火山碎屑物採取装置の採取性能評価. *火山*, 63(1):1-11, 2018.
- [6] 内田太郎, 佐藤匠, 水野正樹, 林真一郎, 岡本敦. 年台風12号における降雨量と斜面崩壊特性, *土木技術資料*. 2011.
- [7] 田村圭司, 山越隆雄, 松岡暁, et.al. 火山灰堆積調査法に関する共同研究報告書. *土木研究所 共同研究報告書*, 2009.